

# **Materialien und Prozesse für zuverlässige Aufbautechnologien von piezoelektrischen Sensorelementen bis 1000 °C**

*F. Kohler, M. Farina, Z. Zeitouny, J. Wilde*

*Institut für Mikrosystemtechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*

*fabian.kohler@imtek.de*

*M. Schulz, H. Fritze*

*Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien, Technische Universität Clausthal*

*michal.schulz@tu-clausthal.de*

---

## **Abstract**

Bauelemente auf der Basis von piezoelektrischen Einkristallen besitzen das Potential, als Sensoren bei extremen Temperaturen eingesetzt zu werden. Besonders Volumenschwinger, bei denen das gesamte Sensorelement in die Schwingung einbezogen ist, scheinen vielversprechend. Materialauswahl, Konstruktion und Herstellverfahren sind für die Robustheit der Sensoren relevant. Ziel ist eine stabile Aufbautechnologie für Temperatur- und Drucksensoren bis 1000 °C.

In Hinblick auf die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) sind sowohl physikalische Größen wie elektrische und mechanische Dämpfung als auch die elektrische Leitfähigkeit in Bezug auf die Sensorfunktion zu berücksichtigen. Im Projekt wurde Saphir als Trägerkeramik verwendet, welche auch auf Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur untersucht wurde. Dazu wurden Möglichkeiten von unterschiedlichen Platin-Metallisierungsprozessen untersucht, sowie deren Eignung für den Einsatz für Hochtemperaturanwendungen. Sowohl die Dünnschichttechnik von gesputtertem Platin auf Saphirsubstrat als auch siebgedruckte Dickfilmsubstrate wurden in dem Projektvorhaben betrachtet.

Eine weitere Herausforderung ist die Zuverlässigkeit bei Temperaturen bis 1000 °C. Im Projekt wurde das Drahtbonden mit Platin als Verbindungstechnik verwendet. Über Zugversuche wurde die Haftung der Bonds auf den metallischen Oberflächen charakterisiert. Ebenso zeigen Glaslote gute Verbindungseigenschaften für Gehäuseelemente bei

hohen Temperaturen. Die Anpassung dieser Materialien an die Ausdehnungskoeffizienten ihrer Fügepartner ermöglicht spannungsarme Verbunde. Im Sinne von Teilchenverbundwerkstoffen ergeben sich die resultierenden Eigenschaften glaskeramischer Lote gemäß Mischungsregeln aus den Eigenschaften der Glas- und der Kristallphasen. Über bildgebende Analyseverfahren wurde die Verbindungsqualität der Einzelkomponenten über das Glaslot genauer betrachtet.

Somit umfasst die Aufbautechnik elektrische Verbindungen durch Metallisierungen und Drahtbonds, eine metallisierte Trägerkeramik und Glaslote zur Verbindung der einzelnen Komponenten. Durch die Wahl von geeigneten Materialien und Prozessen ist die systematische Entwicklung einer thermisch-mechanisch und elektrisch kompatiblen AVT möglich.

---

## 1 Einleitung

Für ein Aufbau- und Verbindungskonzept für piezoelektrische Sensoren bis 1000°C sind die Hochtemperaturmaterialien, aber auch die daraus resultierenden physikalischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Betriebstemperaturen von 1000 °C stellen Herausforderungen in Bezug auf Materialien und Fertigungstechnologie dar. In dieser Arbeit wurden hochtemperaturbeständige Werkstoffe auf Änderungen ihrer physikalischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen untersucht. Daher wurden in dieser Arbeit Platinmetallisierungen und Platinbonddrähte, sowie Gehäuseelemente aus Saphir und Aluminiumoxid verwendet.

Die Eigenschaften der Keramiken hängen von Zusammensetzung, Gefüge, Herstelltechnologie und Oberflächenbeschaffenheit ab [1–3]. Insbesondere die physikalischen Materialeigenschaften können dabei wie folgt unterschieden werden:

- Thermisch-mechanische Eigenschaften (elastische Konstanten)
- Elektrische Eigenschaften als Funktion der Temperatur
- Dielektrizitätskonstante, Isolationswiderstand, Leitfähigkeit,  $\tan \delta$
- Thermisch induzierte Wechselwirkungen zwischen Keramik und Metallisierung

Die elektrische Kontaktierung erfordert ein angepasstes Metallisierungssystem sowohl auf dem  $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ -Sensorelement (CTGS), als auch auf den Keramiksubstraten. Dabei limitiert die angestrebte Einsatztemperatur die verwendbaren Metalle auf solche, mit einem über dieser Temperatur liegenden Schmelzpunkt. Dazu zählen Edelmetalle wie z. B. Platin, Palladium, Wolfram oder Molybdän. Durch die Verwendung einer Pla-

tinmetallisierung in Kombination mit dem Drahtbonden mit Platin kann eine monometallische Verbindung geschaffen werden, wodurch keine zusätzlichen metallurgischen Phänomene in der Verbindungsstelle auftreten.

Ziel der Arbeit ist eine stabile Aufbau- und Verbindungstechnik für piezoelektrische Sensorelementen bis 1000 °C.

## 2 Materialien und Technologien

### 2.1 Piezoelektrische Hochtemperaturmaterialien

Temperaturen von 1000 °C und mehr stellen im Bereich von piezoelektrischen Keramiken eine Herausforderung dar. Konventionelle oder bleifreie piezoelektrische Keramiken scheiden aufgrund ihrer geringen Curie-Temperatur aus (*Tab.1*) [4].

*Tab. 1: Einsatzgrenzen piezoelektrischer Einkristalle [5–8].*

Material	obere Temperaturgrenze [°C]	Anmerkung
$\alpha$ -Quarz ( $\text{SiO}_2$ )	< 450	starke Dämpfung
Kongruentes $\text{LiNbO}_3$	< 300	Zersetzung
Galliumorthophosphat ( $\text{GaPO}_4$ )	~ 900	Phasenübergang
Aluminiumnitrid ( $\text{AlN}$ )	1150	Oxidation
Langasit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ )	1470	Dämpfung
CTGS ( $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ )	1370	Schmelzpunkt
Oxyborate (z. B. $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ )	~ 1500	unbek. Einsatzgrenzen

Einkristalle der Langasit-Familie erlauben deutlich höhere Einsatztemperaturen. Von den zu  $\alpha$ -Quarz isomorphen Verbindungen stellt Langasit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , LGS) das am besten charakterisierte Material dar. Es konnte gezeigt werden, dass Langasit bis zu einer Temperatur von mindestens 1400 °C sowohl in oxidierenden als auch in reduzierenden Atmosphären als Volumenschwinger einsetzbar ist. CTGS-Kristalle, als Vertreter der Langasit-Familie zeigen besonders niedrige elektromechanische Verluste, was bei hohen Temperaturen einen klaren Vorteil darstellt [8].

Der Sensor ist ein BAW-Sensor (Bulk Acoustic Wave). Die Ausbreitung der akustischen Wellen findet in dem 300  $\mu\text{m}$  dicken Substrat statt (*Abb.1*). Beim Anlegen einer

Wechselspannung werden Dickenscherschwingungen erzeugt (umgekehrter piezoelektrischer Effekt).

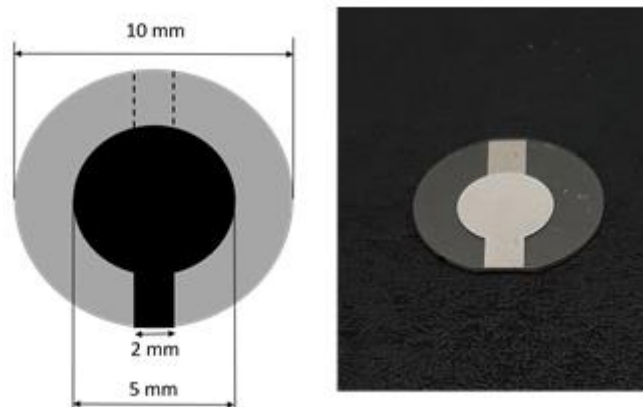


Abb. 1: Links: Schematische Darstellung mit Abmessungen des Bulk Acoustic Wave Resonators (BAW) aus  $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$  (CTGS), Rechts: Bild des CTGS-Resonator mit Siebdruckelektroden.

Masseanlagerungen an den Elektroden erzeugen eine Verschiebung der Resonanzfrequenz. Die Körperschwingungsfrequenz und die Verschiebung ändern sich mit der Temperatur, wodurch ein Sensorsignal erzeugt werden kann [8].

Für die elektrische Kontaktierung des Resonators zu den aus dem Gehäuse herausführenden Platindickschicht-Leiterbahnen wurde das Platindrahtbonds als vielversprechende Methode bewertet. Zum einen bilden Metallisierung und Kontaktierung eine monometallische Verbindung aus, die eine frühzeitige Ablösung durch gleiche thermische Ausdehnungskoeffizienten (Platin  $9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ , Palladium  $11,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ) verhindert. Zum anderen wurde bereits gezeigt, dass Platindrahtbonds bei einer 60-minütigen thermischen Belastung von  $900^\circ\text{C}$  unter Sauerstoffatmosphäre keinen signifikanten Einfluss auf den Kontaktwiderstand oder andere Degradationsanzeichen aufweisen [9]. Das erfolgreiche Platindrahtbonds ist abhängig von den Parametern Temperatur, Bondgewicht, Ultraschallenergie und -zeit, sowie der Haftkraft der Metallisierung auf dem Substrat und dem Substratmaterial selbst.

Unter hohen Temperaturen findet eine Entnetzung der Schicht vom Substrat statt, der vor allem bei Dünnschichten auftritt. Die Ursache dieses Entnetzungsprozesses liegt darin begründet, kompressive Spannungen in der Schicht, die aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten (hier Platin und Saphir) gebildet werden, zu relaxieren.

Der Entnetzungsprozess kann folgendermaßen beschrieben werden: Zuerst beginnt die Lochnukleation mit gleichzeitigem Kornwachstum. Dadurch bilden sich Löcher und es kommt zur Fingerformation mit anschließender Ablösung des Films [10].

## 2.2 Aufbautechnologie

Für eine hermetische Gehäusetechnik von CTGS-Sensoren, die bis 1000 °C stabil sind, werden elektrisch isolierende Materialien in Kombination mit einer geeigneten Metallisierung und Kontaktierung benötigt. Weiterhin sind eine hohe chemische und mechanische Stabilität sowie ein geringer Einfluss von thermisch-elektrischen oder thermisch-mechanischen Störgrößen auf das Messsignal erforderlich.

Die Klassifizierung von keramischen Werkstoffen kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Zu den größten Gruppen gehören Silikatkeramiken, Oxidkeramiken und Nichtoxidkeramiken. Ein weiteres Klassifizierungskriterium ist die Korngröße. Es wird zwischen groben, feinen und monokristallinen Keramiken unterschieden. Saphirglas besteht aus einem hochreinen, synthetischen und monokristallinen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Saphir zeigt aufgrund seiner hohen Reinheit geringere Leitfähigkeitswerte bei hohen Temperaturen als multikristalline Aluminiumoxidkeramiken [3,7].

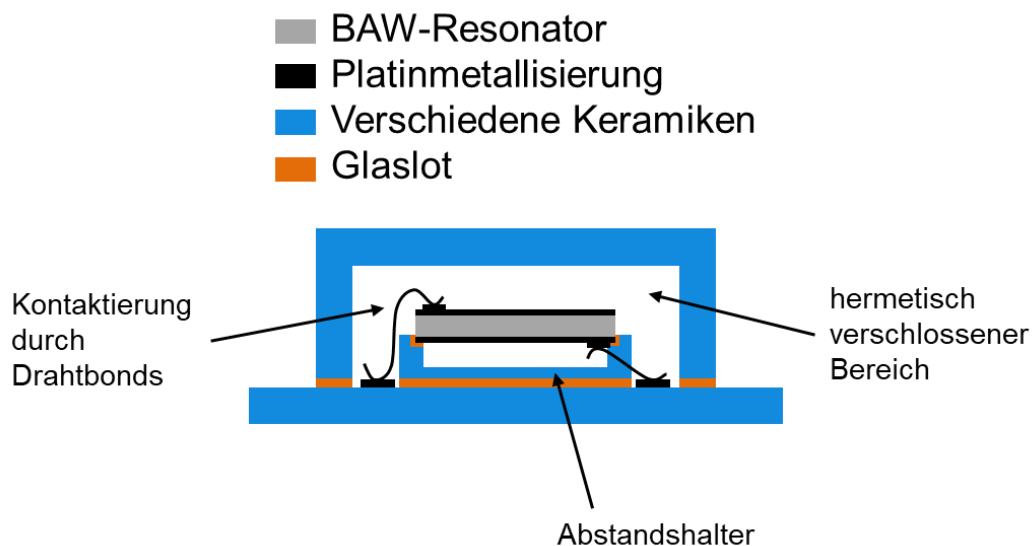


Abb. 2: Prinzipschema des BAW-Resonators mit Aufbau- und Verbindungselementen. Konzept für einen Temperatur- oder Drucksensor.

Die Grundplatte des Sensorgehäuses bildet ein 650 µm dickes Saphirsubstrat mit einer Fläche von 25 mm x 35 mm. Der Abstandshalter aus Aluminiumoxidkeramik für den piezoelektrischen Sensor ist durch eine Glaslotverbindung (Glaslot G018-385) befestigt (Abb. 2). Das Material der Firma Schott ist für eine maximale Betriebstemperatur von 1000 °C spezifiziert. Der Abstandshalter ist als Ultraschallfrästeil speziell auf die Resonatorgeometrie angepasst. Die ober- und unterseitige Kontaktierung erfolgt durch Platindrahtbonden. Die Signalführung zur Außenseite des Gehäuses wird mit einer Dickschichtpaste realisiert. Die keramische Grundplatte wird zunächst im Dickschicht-Siebdruckverfahren mit Kontaktelektroden versehen. Zum Drucken dieser Leiterbahnen wird die Pt-Dickschichtpaste C3620 von Heraeus verwendet. Diese Paste kann nach Herstellerangaben in einem Temperaturbereich von 850 °C bis 1400 °C gebrannt werden. Anschließend erfolgt das Löten der Halterung und des Resonators, sowie die Kontaktierung des Sensors. Im letzten Schritt wird die Sensorbaugruppe mit einer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Kappe verschlossen (Abb.3 rechts).

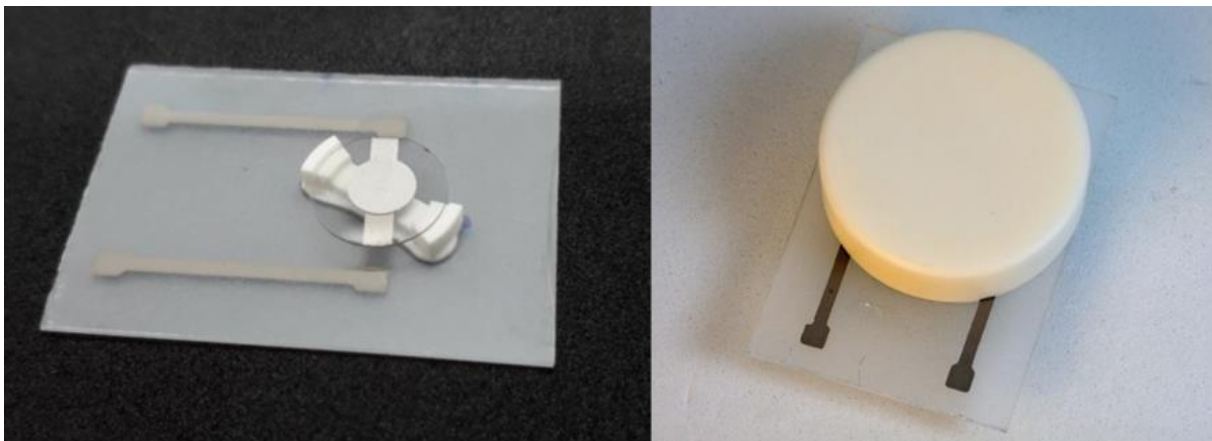


Abb. 3: Aufbaukonzept des BAW-Sensors: Links: Saphirsubstrat mit Platinleiterbahnen und Resonatorhalterung, Rechts: Verschlossene Sensorbaugruppe.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Dünnschicht- und Dickschichtmetallisierung des Saphirs

Zur Charakterisierung der Leiterbahnstruktur werden REM-Aufnahmen verwendet. Die versinterte Platinpaste lässt nach dem Brennvorgang eine poröse Oberflächenstruktur erkennen (Abb.4 links). Der FIB-Schnitt durch einen auf das gesinterte Platin gefügten Bondfuß zeigt die Kompaktierung der Paste im Einflussbereich des Bondgewichts. Kleinere Aufladungseffekte weisen auf nichtleitende Einschlüsse in der Dickschichtpaste hin, welche auf den Glasanteil laut Hersteller hindeuten könnten.

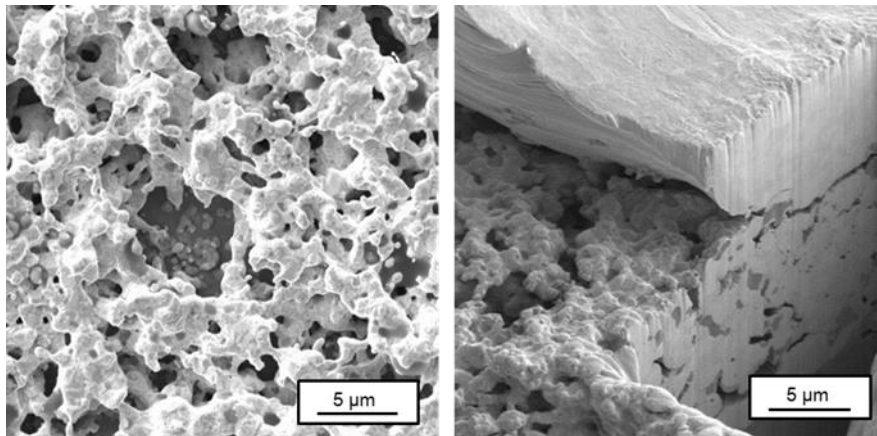


Abb. 4: Struktur der Platindickschicht: 1) REM-Aufnahme der Oberfläche der Platindickschicht, 2) FIB-Schnitt eines Platindrahtbonds auf Platindickschicht.

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt einer gesputterten Kammstruktur. Die Schicht weist eine homogene Metallisierung auf.

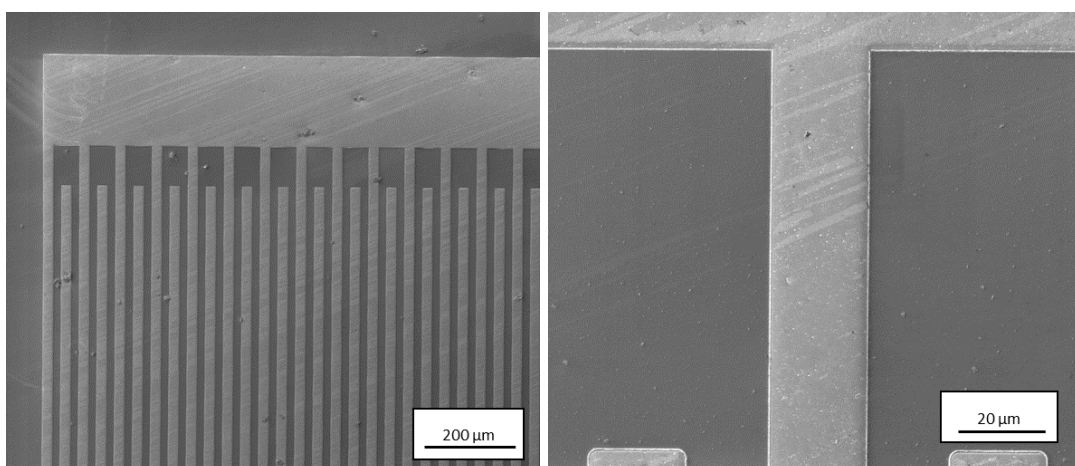


Abb.5: REM-Aufnahme einer 200 nm Platindünnschicht, 20µm breite Kammstruktur vor thermischer Auslagerung.

### 3.2 Thermische Auslagerung

Um Informationen zu erhalten, wie sich die gesputterte Dünnschicht auf Saphir unter hoher Temperaturbelastung verhält, werden thermische Auslagerungsversuche durchgeführt. Ein erster Anhaltspunkt für die Wahl der Maximaltemperatur gibt [10], bei welchem eine 50 nm dicke Platinschicht direkt auf Saphir gesputtert wurde. Bei einer Heizrate von 10 °C / min und einer Temperatur von 800°C weist die Schicht eine Veränderung in der Kornstruktur bereits nach einer Minute auf, nach zwei Stunden bilden sich Löcher und Hillocks. Eine entsprechende erste Auslagerung für die hier verwendete 200 nm dicke Platinschicht fand für sechs Stunden unter 800 °C statt. Die Platinschicht weist vor allem an den Kanten eine gleichmäßige Ausfransung mit gleichzeitiger Entnetzung der Schicht auf.

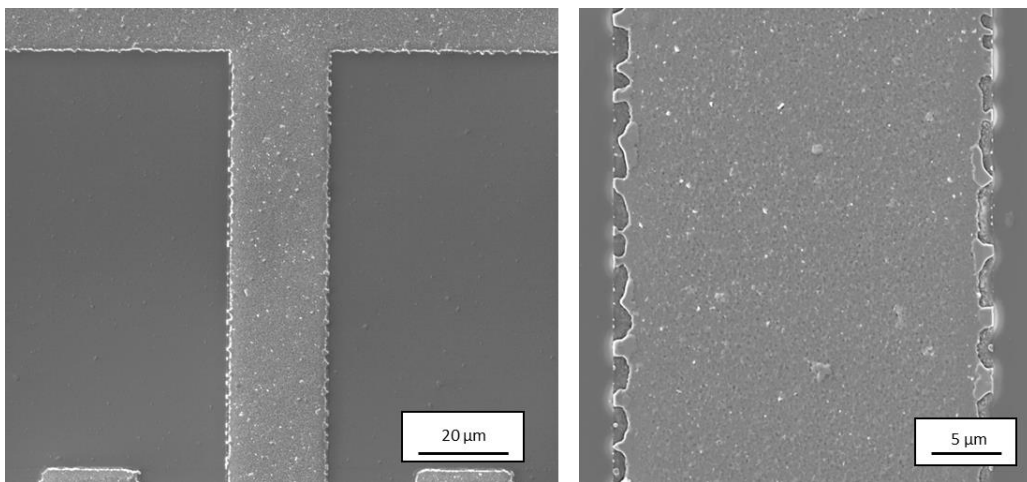


Abb.6: REM-Aufnahme eines Fingerabschnitts der Kammstruktur nach thermischer Auslagerung für 6 Stunden bei 800°C.

In einem weiteren Schritt wurde die Dünnschicht für 6 h bei 1.000 °C ausgelagert. Nach dieser Auslagerung sind deutliche Entnetzungsvorgänge zu erkennen (Abb.7).

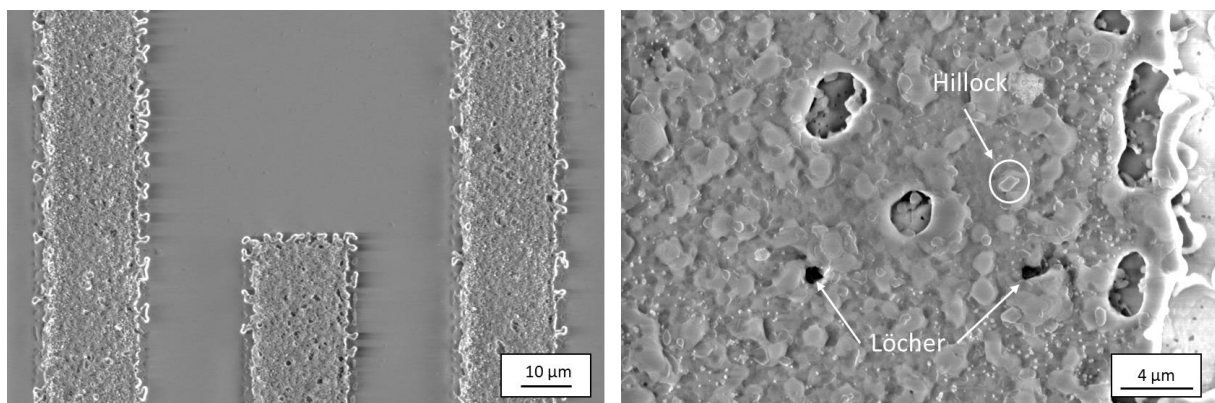


Abb.7: REM-Aufnahme eines Fingerabschnitts der Kammstruktur nach thermischer Auslagerung für 6 Stunden bei 1000 °C.



Als Vergleich zur Dünnschicht lassen die mittels Siebdruck hergestellten Kammstrukturen nach einer thermischen Auslagerung von 6 h bei 800 °C keine Effekte erkennen (Abb.8). Durch den zehnminütigen Brennvorgang bei 1.000 °C zum Versintern der Paste kann für die Auslagerung eine höhere Dauer gewählt werden.

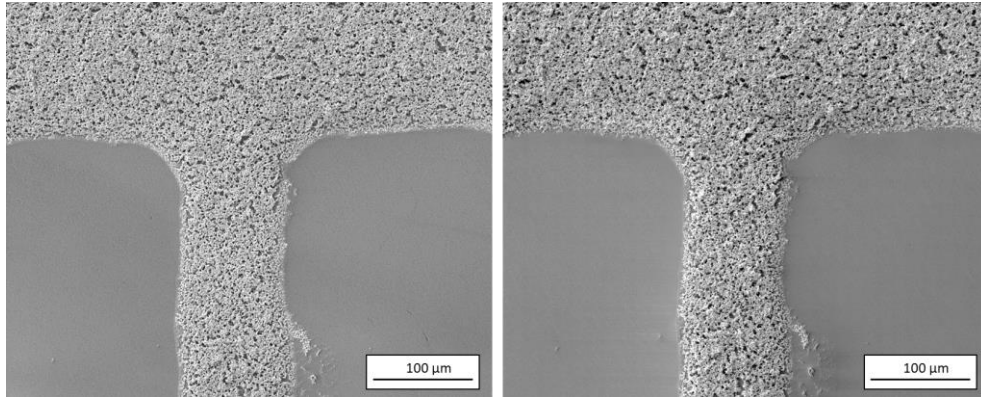


Abb.8: REM-Aufnahme eines mit Platindickfilmpaste siebgedruckten Fingers einer Kammstruktur (links) vor und (rechts) nach 6h thermischer Alterung bei 800 °C.

Für die Bondbarkeit der Dickschicht lässt sich sagen, dass der Bondprozess weiter evaluiert werden muss. In einem ersten Versuch wurde gezeigt, dass die Zugkräfte nach thermischer Last sinken, jedoch ist die Streuung des Bondprozesses aufgrund der Porosität hoch.

Die Auslagerung einer weiteren Kammstruktur für 24 h bei 1000 °C zeigt, dass die Schichtoberfläche sich durch höhere Temperaturen weiter verändert (Abb.9 links). Die zuvor stark poröse Oberfläche lässt nun an weiteren Stellen größere Körner erkennen. Weiterhin sind mehr Verbindungen an den Kornübergängen zu erkennen (Abb.9). Daraus lässt sich schließen, dass der zehnminütige Brennschritt den Sinterprozessschritt des Platins nicht abgeschlossen hat. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis kann der gefundene Parametersatz für den Platinbondprozess auf diese Oberflächen angewendet werden.

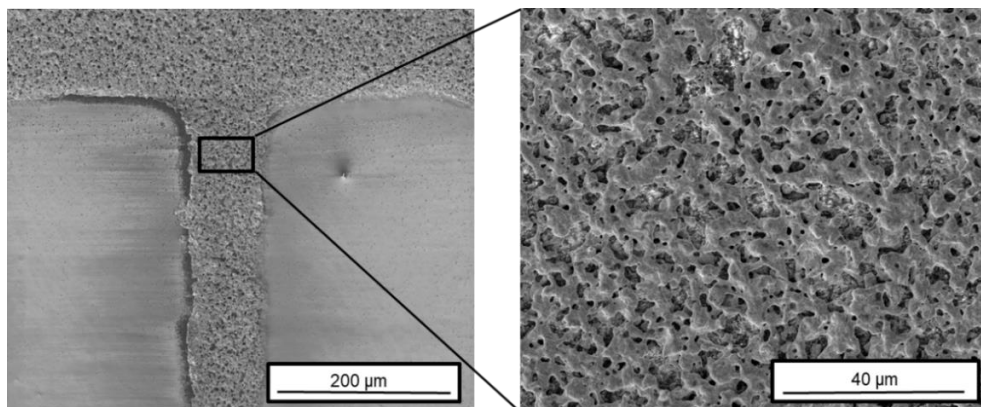


Abb.9: REM-Aufnahmen der Platindickfilmpaste nach 24h thermischer Alterung bei 1000 °C.

### 3.3 Kontaktierungstechnik

Zur Evaluierung einer temperaturstabilen Verbindungstechnik gehört neben der Schichtanalyse auch die Analyse der Verbindung von Bonddraht und Oberfläche. Neben der rein quantitativen Analyse von Zugkräften bis zur Zerstörung des Drahtes, soll auch der Ausfallmechanismus genauer betrachtet werden. Folgende Ausfallmechanismen werden beobachtet: Delaminierung des Bondpads vom Substrat, Ablösen des Bondfußes vom Bondpad (Liftoff), Drahtriss am Heel durch eine Vorschädigung des Drahtes im Schweißprozess und Drahtriss im Loop.

Weiter kann über den Ausfallmechanismus von Bonddrähten vor und nach thermischer Alterung eine zusätzliche Aussage über die Haftfestigkeit der Metallisierung auf dem Substrat getroffen werden. Für die Evaluierung des Temperatureinflusses auf die Haftfestigkeit des Drahtbonds und der Metallisierung auf dem Substrat wurden je 25 Bonddrähte mit einem Drahtdurchmesser von  $25\text{ }\mu\text{m}$  auf mehrere Dünnschicht-Metallisierungen gebondet. Die Drahtbonds wurden mit einem Dünndrahtbonder 5430 der Firma Delvotec mit folgenden Parametern gebondet:  $0,47\text{ N}$  Bondgewicht,  $400\text{ mW}$  Ultraschallleistung,  $50\text{ ms}$  Ultraschallzeit,  $60\text{ kHz}$  Ultraschallfrequenz und  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  Prozesstemperatur. Die Zugversuche wurden sowohl vor als auch nach thermischer Auslagerung für  $6\text{ h}$  bei  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durchgeführt (Abb.10).

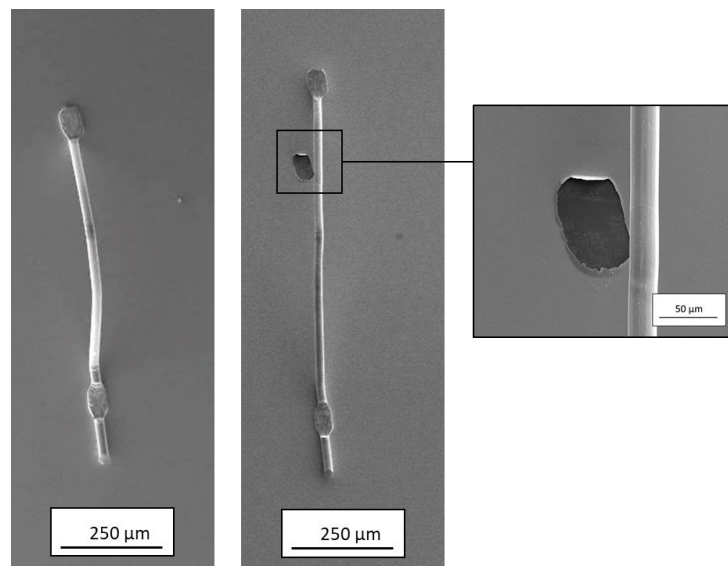


Abb.10: Drahtbond auf Dünnschicht vor (links) und nach Pullversuch und thermischer Alterung für  $6\text{ h}$  bei  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mit auftretender Delamination der Metallisierung.

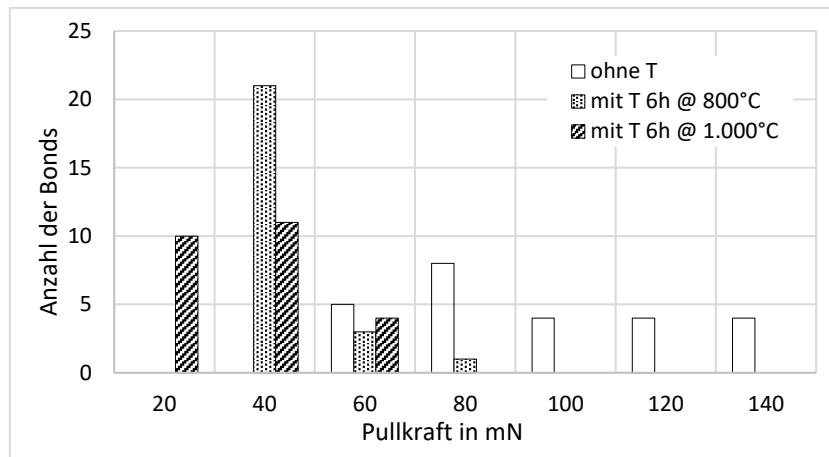


Abb.11: Verteilung der Bondfestigkeit auf 200 nm Platinschicht. Ohne thermische Belastung und mit thermischer Auslagerung der Dünnschicht für 6 h bei 800 °C und 1000 °C.

Abbildung 11 zeigt, dass die thermisch nicht belasteten Drahtbonds im Bereich von 100 mN Zugkraft liegen. Nach einer thermischen Belastung von 6 h bei 800 °C reduziert sich diese auf einen Bereich ab 40 mN. Drahtbonds welche ebenfalls über 6 h bei 1000 °C ausgelagert wurden, zeigen hier überwiegend Zugkräfte im Bereich um 40 mN.

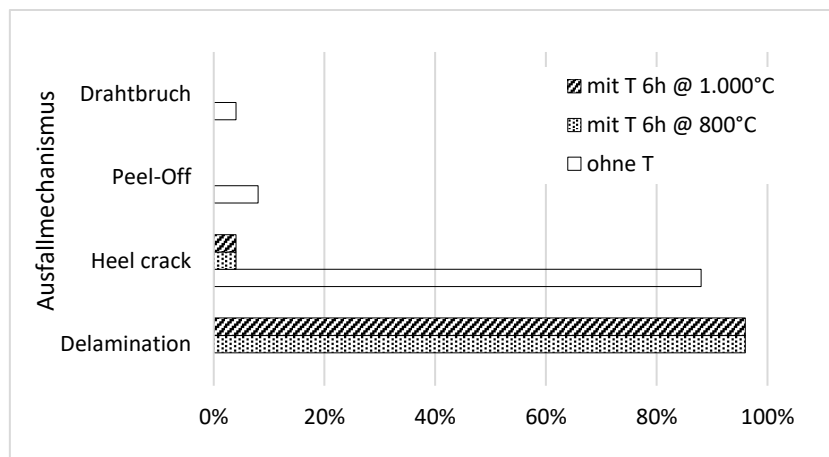


Abb.12: Ausfallmechanismus über der Prozentzahl der insgesamt getesteten Drahtbonds. Ohne thermische Belastung und mit thermischer Auslagerung für 6 h bei 800 °C und 1000 °C der 200 nm Platinschicht mit Drahtbonds.

Abbildung 12 zeigt, dass sich durch die thermische Belastung der Substrate die Ausfallursache ändert. Bei einem Heel crack handelt es sich um Brüche im Übergangsbereich zwischen Wedge (verformter Bereich des Drahtes) und dem unbearbeiteten Draht. Der

über 80 % wahrscheinliche Ausfallmechanismus Heel crack der thermisch nicht belasteten Drahtbonds ändert sich durch die thermische Auslagerung auf über 90 % Delamination. Dies deutet auf eine Schichtdegradation der 200 nm Platinschicht hin.

### 3.3 Glaslotverbindung

Das zum Gehäuseaufbau verwendete Glaslot G018-385 von Schott erlaubt nach Herstellerangaben eine maximale Betriebstemperatur von 1000 °C. Es wurde für das Hochtemperaturlöten von Aluminiumoxid-Keramiken entwickelt. Mit einem Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  von 20-300 =  $8,37 \cdot 10^{-6}$  1/K liegt das Material im Bereich von gängigen Aluminiumoxidkeramiken [11].

Um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Verbindungsqualität der Glaslotverbindung genauer zu betrachten, wurden die Saphiroberflächen mit Hilfe eines Trumpf TruMark 6350 aufgeraut. Dazu wurde sowohl ein Linienmuster als auch ein Kreismuster mit dem Laser abgefahren. Die Oberflächenrauigkeit wurde mithilfe eines Weißlichtinterferometers vermessen. Die verwendeten 650  $\mu\text{m}$  dicken Substrate wurden aus einem einseitig polierten Wafer geschnitten. Daher wurde in der Analyse sowohl die unpolierte (*raue*, Abb.13) als auch die polierte Seite betrachtet.

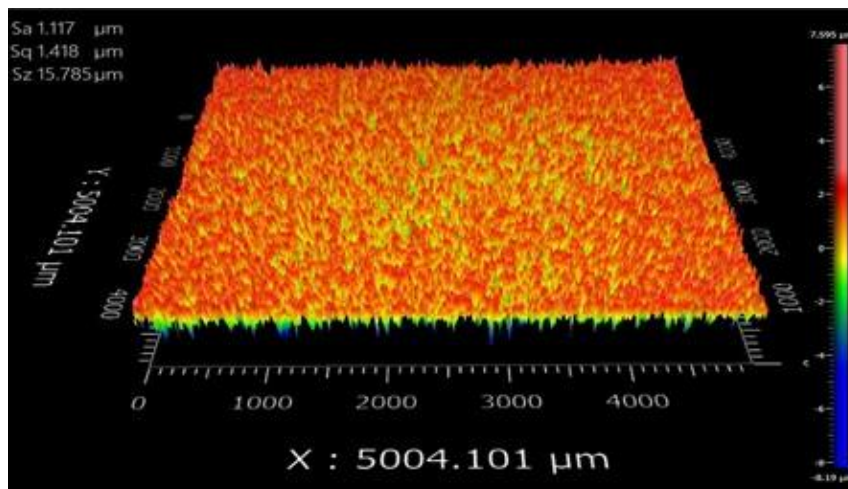


Abb.13: Messung der Oberflächenrauigkeit  $S_a$  der rauen Saphiroberfläche,  $S_a < 1,5 \mu\text{m}$ .

Die Ergebnisse der arithmetischen mittleren Rauheit  $S_a$  zeigt Tabelle 2.

Tab. 2: Oberflächenrauigkeit  $S_a$  der Saphiroberfläche, gemessen über Weißlichtinterferometer

Betrachtete Oberfläche	Oberflächenrauigkeit $S_a$
Poliert (Hersteller)	$< 0,003 \mu\text{m}$
Rau (Hersteller)	$< 1,5 \mu\text{m}$
Aufgeraut (Linienmuster)	$6 \mu\text{m}$
Aufgeraut (Kreismuster)	$15 \mu\text{m}$

Zur Untersuchung der Haftfestigkeit wurden Schertests an  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  Aluminiumoxid-Chips durchgeführt, welche auf die aufgerauten Oberflächen glasgelötet wurden. Der Stichprobenumfang betrug jeweils neun Chips pro Oberfläche.

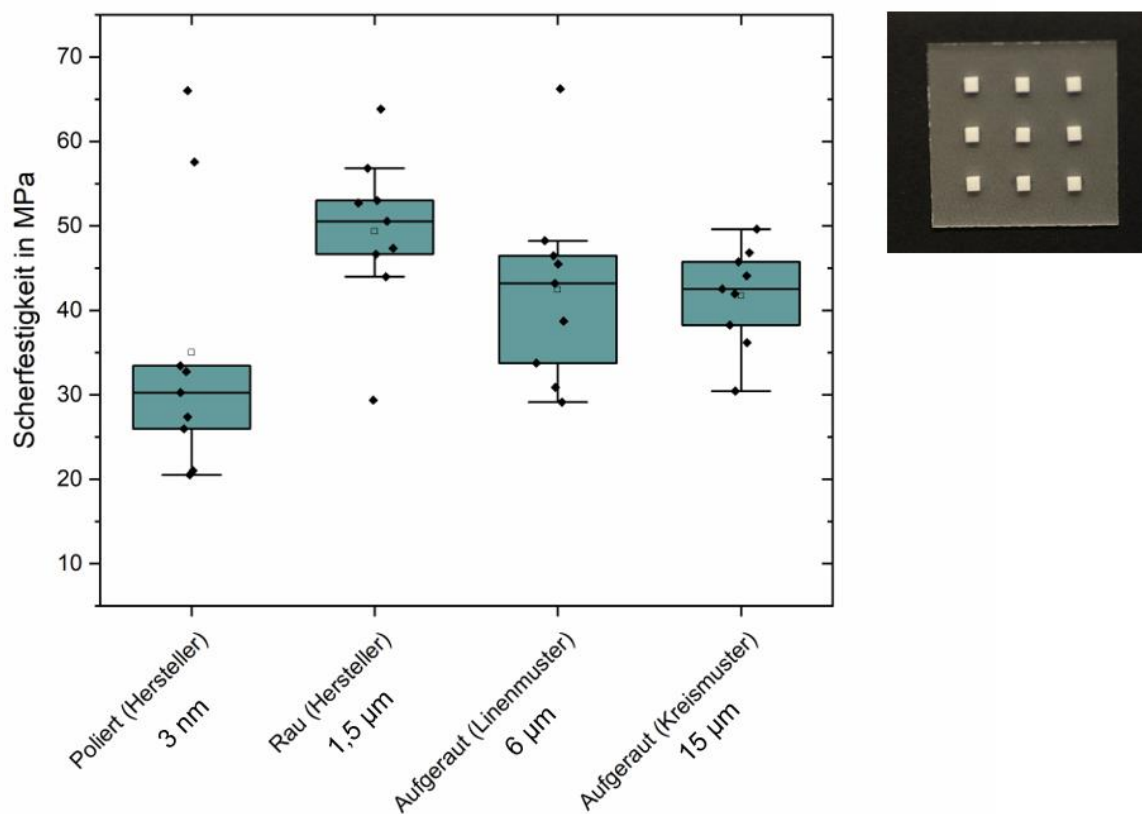


Abb. 14: Schertests von jeweils 9 Testchips aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf unterschiedlich strukturierten Saphirsubstraten, gelötet mit Glaslot G018-385.

Es zeigt sich, dass auf einer Oberfläche des Saphirs mit einem Mittenrauwert von  $S_a = 1,5 \mu\text{m}$  ein Mittelwert von 50 MPa die beste Scherfestigkeit gemessen werden kann (Abb. 14). Eine weitere Erhöhung der Rauigkeit lässt keine besseren Scherfestigkeitswerte erkennen. Dies zeigen die Mittelwerte von ca. 42 MPa Scherfestigkeit der aufgerauten Saphiroberflächen. Die eher geringen Werte der glatt polierten Oberfläche von ca. 30 MPa deuten darauf hin, dass für eine höher feste Verbindung ein Formschlussanteil fehlt. Die Verklammerung des in der Kristallisationsphase niederviskosen Glaslots mit dem Saphirglas kann nach dem Brennvorgang des Lotes durch ein Schliffbild deutlich gemacht werden.

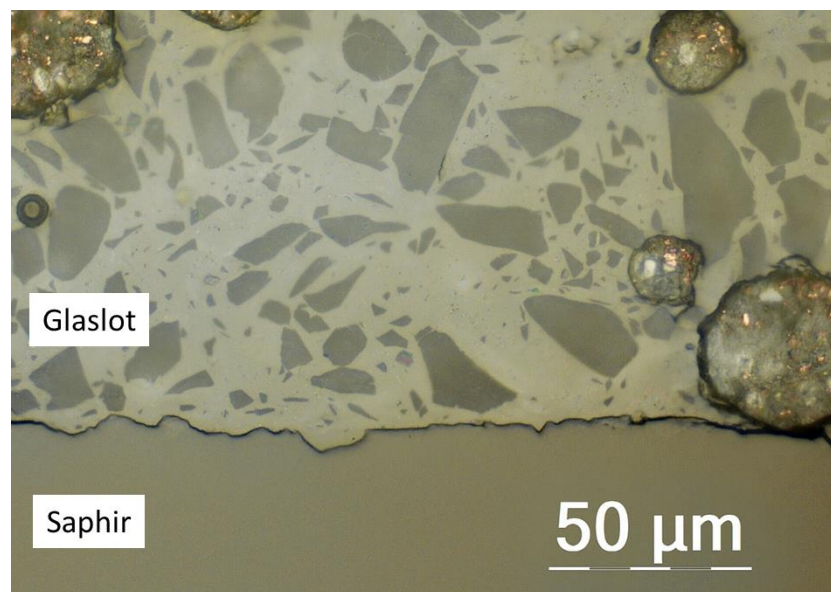


Abb. 15: Querschliff von Glaslot auf Saphirsubstrat, Oberflächenrauigkeit  $S_a = 1,5 \mu\text{m}$  (Saphir).

Abbildung 15 zeigt im Querschliff, dass die Oberflächenunebenheiten des Saphirs gut durch das Glaslot ausgefüllt werden und so eine gute Oberflächenbenetzung gewährleistet ist. Die Abbildung lässt auf einen Formschluss, also eine mechanische Verklammerung (Mikroverzahnung) von Glaslot und Saphir schließen. Es ist zu vermuten, dass höhere Rautiefenwerte nicht mehr zur Verbesserung der Scherfestigkeit beiträgt.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Materialien und Prozesse betrachtet, welche ein Aufbau- und Verbindungskonzept für piezoelektrische Sensoren bei hohen Temperaturen ermöglichen. Als Aufbautechnik wurde ein Konzept aus Saphirsubstraten mit hochreinen Aluminiumoxidaufbauten dargelegt. Die Füge-technik für die Hochtemperaturanwendung

wird durch Glaslöten, Platinmetallisierungen und Platindrahtbonds realisiert. Durch Schertests an glasgelöteten Keramikchips konnte gezeigt werden, dass eine rauere Oberfläche des Saphirs aufgrund des Formschlusses für eine bessere Haftung der Keramiken sorgt. Diese ist jedoch durch die begrenzte Oberflächenbenetzung des Glaslots auf dem Saphir beschränkt.

Die Dünnschicht- und Dickschichtplatinoberflächen auf Saphir lassen sich durch ihre Oberflächenstruktur voneinander abgrenzen. Während die Dickschicht eine eher poröse Oberfläche aufweist, zeigt die Dünnschicht eine homogenere Beschichtung. Nach thermischer Alterung weisen die Dünnschichten gleichmäßige kleine Materialanhäufungen mit gleichzeitiger Entnetzung auf. Weiterhin konnte über die thermische Alterung von Bonddrähten eine Aussage über die Haftfestigkeit der Metallisierung getroffen werden. Hier zeigt sich eine Verschiebung des Ausfallmechanismus in Richtung Delamination. Die Dickschicht lässt nach der thermischen Auslagerung von 6 h keine wesentlichen Degradationseffekte erkennen. Durch eine weitere Auslagerung für 24 h bei 1000 °C konnte eine Nachversinterung der Dickschicht beobachtet werden. Die Platinkörner weisen nach diesem Vorgang größere Körner und mehr Kornübergänge auf, was sich positiv auf den Drahtbondprozess mit Platin auswirken kann.

Daher wird das Vorhaben mit der Dickschicht für den Leiterbahnaufbau fortgesetzt. In weiterführenden Untersuchungen soll die Langzeitbeständigkeit des Aufbaus bei hohen Temperaturen untersucht werden. Hierfür wurde ein Prototyp des Sensorgehäuses für den piezoelektrischen Hochtemperatursensor aufgebaut, sodass sowohl Aufbau- als auch Verbindungstechnik für Temperaturen bis 1000 °C erprobt werden können.

## **Danksagung**

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Finanzierung der Forschung der Vorhaben FR 1301/35-1 und WI 1987/6-1.

## **Literatur**

- [1] N. Subbiah, S. Ghosh, R. Zeiser, J. Wilde, "Comparison of packaging concepts for high-temperature pressure sensors at 500 °C,"
- [2] P. Hofmann, K. Jacobs, H. Federmann, M. Schulz, H. Fritze, H. L. Tuller, Growth and high-temperature properties of gallium orthophosphate, Solid State Ionics 177 (2006) 3175-3178.

- [3] C. Liang-Yu, Temperature dependent dielectric properties of polycrystalline aluminium oxide substrates with various impurities, Proc. 8th Int. Conf. on Electronic Packaging Technology (2007), pp. 1-6.
- [4] Shrout, T. R.; Zhang, S. J.: Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT?, Journal Electroceramics 19 (2007) 113-126.
- [5] D. Damjanovic, Materials for high temperature piezoelectric transducers, Curr. Opin. Solid State Mat. Sci. 3 (1998) 469-473.
- [6] R. W. Cernosek, J. R. Bigbie, M. T. Anderson, J. H. Small, P. S. Sawyer, High temperature hydrocarbon gas sensing with mesoporous SiO<sub>2</sub> thin films on TSM resonators, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, 8.-11.6.1998.
- [7] P. Auerkari, Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics, VTT Manufacturing Technology 1792 (1996) X-26.
- [8] H. Fritze, O. Schneider, H. Seh, H. L. Tuller, G. Borchardt, "High temperature bulk acoustic wave properties of langasite," Phys. Chem. Chem. Phys. 5, 2003, 5207-5214.
- [9] J. Mantese, W. Alcini, Platinum Wire Wedge Bonding: A New IC And Interconnect, Journal of Electronic Materials, Vol. 17, 1988.
- [10] G. Atiya, D. Chatain, V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, W. Kaplan, The role of abnormal grain growth on solid-state dewetting kinetics, Acta Materialia 81, 2014.
- [11] C. Schilling, Fügen von keramischen Komponenten der Hochtemperatur-Brennstoffzellen mittels Glas- und Glaskeramikloten, Erlangen, 2012.



## **Autorenanschriften**

Fabian Kohler

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Institut für Mikrosystemtechnik

Georges-Köhler-Allee 103

79110 Freiburg

Telefon: 0761-203 7317

Telefax: 0761-203 7292

E-Mail: [fabian.kohler@imtek.uni-freiburg.de](mailto:fabian.kohler@imtek.uni-freiburg.de)